

N78-32275

A Reproduced Copy

OF

N78-18701

TM-75334

Reproduced for NASA

by the

NASA Scientific and Technical Information Facility

**REPRODUCIBLE COPY
(FACILITY CASSETTE COPY)**

c65-34

A76-18701 # Optical measurements of the droplet size distribution in the case of fuel atomization in swirl nozzles and in axisymmetric and planar airblast diffusers (Optische Messungen der Tröpfchengrößenverteilung bei der Brennstoffzerstäubung in Dralldüsen sowie rotationsymmetrischen und ebenen Luftstromzerstäubern). A. Kayser (Deutsche Forschungs- und Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt, Institut für Antriebstechnik, Cologne, West Germany). *Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt, Symposium über Klemmströmungen*, Stuttgart, West Germany, Oct. 11, 12, 1977, Paper 77-067, 35 p. 9 refs. In German.

The wave theory of light diffraction can be used to measure rapidly the distribution of droplet sizes in sprays. Light diffraction measurements provide information concerning the relative frequency distribution of all droplets in the range from 1 micrometer to 2.5 mm. The theoretical principles of optical methods for the determination of the particle sizes of sprays are considered and aspects of the experimental implementation of these principles are discussed. An experimental device for point-intensity measurements makes use of a helium-neon laser. The cross-sectional area of the laser beam is enlarged with the aid of a lens system to the size of the measurement cross section. The intensity of the laser light scattered by the spray particles is measured as a function of light direction. Approaches which take into account the total energy of the diffractively scattered light are also discussed and an investigation is conducted regarding the measurement error sources. A description is presented of experimental results obtained in studies of a number of fuel nozzle sprays.

G.R.

**This Abstract Published in
INTERNATIONAL AEROSPACE ABSTRACTS**

**Issued by
TECHNICAL INFORMATION SERVICE
AMERICAN INSTITUTE OF AERONAUTICS AND ASTRONAUTICS, INC.
750 THIRD AVENUE, NEW YORK, N.Y. 10017**

KLEINGASTURBINEN
Stuttgart
Oct. 11-12, 1977
DGLR

DGLR-Symposium "Kleingasturbinen"
Stuttgart 11./12. Oktober 1977

Vorabdruck: DGLR-Nr. 77-067

RECEIVED
A.I.A.A.
78 JAN -5 PM 12:36
T. I. S. LIBRARY

A78-18701

Optische Messungen der Tröpfchengrößenverteilung bei
der Brennstoffzerstäubung in Dralldüsen sowie rotations-
symmetrischen und ebenen Luftstromzerstäubern

Albrecht Kayser*

Z u s a m m e n f a s s u n g: Die Wellentheorie der Lichtbeugung kann benutzt werden, um die Verteilung der Tröpfchengrößen in Zerstäubungsnebeln schnell zu messen, d.h. die Parameter von Verteilungsfunktionen, deren Gültigkeit vorausgesetzt wird, zu bestimmen. Bei der Berechnung der winkelabhängigen Vorwärtsbeugung spiegeln sich die Parameter der funktionsmäßigen Tröpfchenspektren nämlich deutlich genug in den theoretischen Streulichtverläufen, um sich durch den Vergleich der Meßsignale mit diesen identifizieren zu lassen. Das gilt sowohl für die Verläufe der punktwise zu messenden Intensität als auch der ringförmig und der kreisflächenmäßig meßbaren Energie des gebeugten Lichtes, wobei letztgenannte Messung sich mit kleinstem Aufwand durchführen läßt. Solange der Nebel genügend durchleuchtbar ist, werden alle Tröpfchen zwischen 1 μ m und 2,5 mm in der relativen Häufigkeitsverteilung erfaßt. Es werden Tröpfchenspektren von Druckzerstäubern mit Drall und von Luftstromzerstäubern mit und ohne Dralldurchströmung analysiert. Im Gegensatz zur Messung der mittleren Tröpfchenfeinheit zeigt die Messung des Gesamtspektrums an, wann und welche Maßnahmen zur Vermeidung vereinzelter großer Tröpfchen zu treffen sind.

*Dipl.-Ing. A. Kayser, DFVLR, 5000 Köln 90,
Institut für Antriebstechnik, Direktor: Dr.-Ing.G.Winterfeld
Abteilung: Strömung und Verbrennung, Leiter: Dr.-Ing.H.Eickhoff.

1. Einleitung und Aufgabenstellung:

Der Einsatz von schwereren Brennstoffen sowie die weitere Reduzierung der Schadstoffe in den Abgasen stellen hohe Anforderungen an die Brennstoffaufbereitung und -einbringung, da es auf der einen Seite schwieriger wird, den Brennstoff fein zu zerstäuben und rasch zu verdampfen, andererseits aber gerade, um letzteres doch zu ermöglichen, die Zerlegung der Flüssigkeit in noch kleinere Tröpfchen unumgänglich wird. Gleichzeitig muß das Spektrum der Tröpfchengrößen möglichst eng gehalten, müssen auch einzelne größere Tröpfchen vermieden werden, und muß der Brennstoff möglichst schon während der Zerstäubung und vor seiner Verdampfung homogen mit der für seine Verbrennung erforderlichen Luft vermischt werden. Dies alles ist bei kleinstmöglichem Energieeinsatz zu gewährleisten. Der Luftstromzerstäuber bietet insofern gute Voraussetzungen, als die Treibluft nicht nur die Zerstäubung bewirkt, sondern auch den Tröpfchennebel in den Brennraum befördert und mit den heißen Gasen vermischt. Der Luftstromzerstäuber wäre ideal, wenn die am Flammrohr verfügbare Druckdifferenz ausreichen würde, um zu zerstäuben und gleichzeitig die ganze Primärverbrennungsluft homogen mit feinen Brennstofftröpfchen zu beladen. Bei konventionellen, mit Drall durchströmten Baumustern scheint die Treibluftenergie sich nicht so wirkungsvoll einsetzen zu lassen, wie bei ohne Drall durchströmten, zweidimensionalen Typen, die sehr aussichtsreich erscheinen. Bei der notwendigen Weiterentwicklung der Aufbereitungstechnik leistet ein berührungsloses, rationelles Meßverfahren der Zerstäubungsgüte, wie die Ermittlung der Tröpfchengrößen und ihrer relativen Verteilung im Sprühnebel aus der Lichtbeugung an den Tröpfchen, gute Dienste.

Beim Zerstäubungsvorgang entsteht nach statistischen Gesetzen ein mehr oder weniger breites Spektrum von unterschiedlichen Tröpfchengrößen, wie es in Bild 1 dargestellt ist. In Kurve a ist die Anzahl der pro Durchmesserintervall vorgefundenen Tröpfchen bezogen auf die Gesamttröpfchenzahl aufgetragen. Im allgemeinen gibt es ein ausgeprägtes Häufigkeitsmaximum bei einer Tröpfchengröße, die meist nicht mitten zwischen dem kleinsten und dem größten Tröpfchen liegt, sondern stark zu den kleinen

Tröpfchen hin verschoben ist. Rechts und links vom häufigsten Tröpfchendurchmesser fällt die Tröpfchenhäufigkeit steil ab, wobei sie zum maximalen Durchmesser hin besonders flach ausläuft. Die Anzahl der sehr großen Tröpfchen liegt mehrere Zehnerpotenzen unter der der häufigsten Tröpfchengröße. Die Kurve b zeigt den entsprechenden Volumenhäufigkeitsverlauf, bei dem der pro Durchmesserintervall angetroffene Volumenanteil aufgetragen ist. Da das Tröpfchenvolumen mit der dritten Potenz des Durchmessers wächst, fällt das Maximum der Volumenansammlung auf einen größeren Tröpfchendurchmesser als die höchste Tröpfchenhäufigkeit. Im allgemeinen verteilt sich aber auch das Flüssigkeitsvolumen überwiegend auf die kleineren Tröpfchen. In der Volumensummenkurve c ist jeweils das Volumen der Tröpfchen aufsummiert, die einen kleineren als den angezeigten Durchmesser haben. Bei den großen Tröpfchendurchmessern der Verteilung wächst die Volumensumme wegen der Seltenheit der Tröpfchen nur noch sehr wenig. Der maximale Durchmesser tritt selbst nicht mehr auf und stellt wegen des schleifenden Schnittes der Häufigkeitskurve mit der Abzisse ein relativ unsicheres Kriterium dar. Da aber die großen Tröpfchen die längste Aufenthaltszeit im Brennraum erfordern und die Schadstoffbildung und den Ausbrenngrad stark beeinflussen, gibt der Auslauf der Häufigkeitskurve beim maximalen Durchmesser neben der mittleren Tröpfchenfeinheit den Ausschlag für die Sprühnebelqualität. Nebel mit gleicher mittlerer Feinheit können zum Beispiel sehr unterschiedliche maximale Tröpfchengrößen aufweisen. Der als mittlerer Durchmesser in das Bild eingetragene Sauterdurchmesser D_{32} , bildet das Maß für die spezifische Oberfläche des Nebels, da bei seiner Berechnung gemäß Gleichung (1) das Gesamtvolumen aller Tröpfchen zu ihrer Gesamtoberfläche ins Verhältnis gesetzt wird.

$$D_{32} = \frac{\int_0^{D_{\max}} n'(D) D^3 dD}{\int_0^{D_{\max}} n'(D) D^2 dD} \quad (1)$$

$$n_{32} = (\beta + e^{\beta} \cdot \beta^2 \cdot \text{Ei}(-\beta)) D_{\max} \quad (1a)$$

$$\frac{dn}{dx} \frac{1}{n_0} = \frac{\frac{(1-x)}{x^5} \cdot e^{-\beta/x}}{x=1} \quad (2)$$

$$\frac{(1-x)}{x^5} \cdot e^{-\beta/x} \cdot dx$$

$$x=0$$

$$x = \frac{n}{D_{\max}} \quad (3) \quad x_h = \frac{n_{\text{hfgst}}}{n_{\max}} \quad (3a)$$

$$\beta = \frac{5 - 4x_h}{\frac{1}{x_h} - 1} \quad (4)$$

$$\frac{dV}{dx} \frac{1}{V_0} = \frac{\frac{(1-x)}{x^2} \cdot e^{-\beta/x}}{x=1} \quad (5)$$

$$\frac{(1-x)}{x^2} \cdot e^{-\beta/x} \cdot dx$$

$$x=0$$

Der funktionelle Zusammenhang der in Bild 1 gezeigten Kurven wird durch das Größenverteilungsgesetz von Rinkes [8] in einer Modifikation, Gleichungen (1a-5), nach Fahrni [in 8] beschrieben. Das Gesetz wurde aus einem statistischen Ansatz heraus entwickelt und benutzt für die Charakterisierung einer Größenverteilung zwei unabhängige Parameter, beispielsweise zwei der in Bild 1 eingezeichneten, charakteristischen Durchmesser. Im Vergleich zu drei parametrischen Verteilungsfunktionen schränkt die Rinkesverteilung das Feld der möglichen Größenverteilungen stark.

ein, indem sie beispielsweise die Breite der Häufigkeitsspitze fest mit ihrer Lage im Gesamtspektrum verbindet. Der Peak wird umso schmaler, je weiter vom maximalen Durchmesser entfernt er auftritt. Für das optische Meßverfahren wird eine Verteilungsfunktion benötigt, deren Parameter ermittelt werden sollen. Zwei statt drei Größen zu bestimmen, bereitet weniger Mühe. Die Ringesfunktion wurde aber auch deshalb unter den vielen empirischen und halbempirischen Verteilungsfunktionen in der Literatur ausgewählt, weil sie alle bisher untersuchten Sprühnebel relativ zutreffend wiedergibt. Im weiteren wird die Funktion stets in Abhängigkeit von den Parametern Sauterdurchmesser, Gl.(1a), und Durchmesser Verhältnis x_h , Gl.(3a), dargestellt, das den häufigsten Durchmesser auf den maximalen Durchmesser bezieht und ein Maß für die Asymmetrie der Verteilung bildet.

Gegenüber der Charakterisierung einer Zerstäubung durch den Sauterdurchmesser ist natürlich die Kenntnis der Gesamtverteilung mit kleinstem, häufigstem größtem und mittlerem Durchmesser vorzuziehen. Das ist besonders wertvoll für das Eintreten in mathematische Modelle der Verbrennung, die die Verdampfung einschließen. Da man häufig die Gesamtbrennstoffmenge im Nebel kennt, reicht dann die auf optischem Wege mögliche Bestimmung der Tröpfchengrößen und ihrer relativen Häufigkeit aus. Bei der Brennstoffzerstäubung treten Tröpfchengrößen von etwa $1\ \mu\text{m}$ bis etwa $1\ \text{mm}$ Durchmesser auf. Bei den üblichen Meßmethoden lassen sich die kleinen Tröpfchen nur sehr schwer entdecken und messen. Auch die großen Tröpfchen werden wegen ihrer Seltenheit nicht immer gefunden. Alle Tröpfchen bewegen sich mit unterschiedlicher Geschwindigkeit in verschiedene Richtungen, und es muß eine repräsentative Probe des Nebels mit mindestens 10 000 Tröpfchen aufgefangen werden, ohne deren Größenverteilung durch Verschmelzung oder Sekundäraufsplitterung zu verändern. Ohne auf die Fehlerquellen bei den konventionellen Methoden weiter einzugehen, sei darauf hingewiesen, daß in jedem Fall eine Unzahl kleinster Raumausschnitte mit einer aufwendigen Automatik abgetastet werden muß, daß zigtausend Tröpfchen gefunden, klassiert und ausgezählt werden müssen. Die optische Meßmethode erfaßt dagegen alle im Meßstrahlvolumen befindlichen Tröpfchen gleichzeitig, berüh-

rungslos und störungsfrei. Außerdem arbeitet sie schnell und mit einer einfachen, preiswerten Apparatur, so daß man sich seit nahezu 20 Jahren in den USA, in England, Frankreich und Deutschland darum bemüht, das Streulichtmeßverfahren zu vervollkommen [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9]. Hierbei haben sich die Lichtquellen und Lichtmeßgeräte laufend modernisiert, und die Auswertung ist weiterentwickelt worden.

2. Meßverfahren und -anlagen

2.1 Die theoretischen Grundlagen der optischen Zerstreuungsmessung wurden bereits früher dargestellt [9] und werden relativ kurz skizziert. Wird ein Tröpfchen in einen Lichtstrahl gebracht, so erzeugt es Streulicht durch Reflektion, Lichtbrechung und Lichtbeugung, wobei in Richtungen, die weniger als 10° von der Ausbreitungsrichtung des Strahles abweichen, die erstgenannten beiden Effekte gegenüber der sogenannten Vorwärtsbeugung vernachlässigbar klein sind. Die Beugung entsteht aus dem Wellencharakter des Lichtes durch die Interferenzstörung für die Elementarwellen im Bereich des Hindernisses. Für die Fraunhoferbeugung, die bei Hindernissen, die größer als die Wellenlänge des Lichtes sind, gilt, beschreibt die von Kirchhoff hergeleitete Gleichung 6

$$I = E_0 \left[\frac{D}{2\alpha} \cdot J_1 \left(\frac{\pi D \alpha}{\lambda} \right) \right]^2 \quad (6)$$

J_1 = Besselfunktion

die richtungsabhängige Energiestreuung als Funktion der Hinderungsgröße. Das Bild 2 zeigt für vier verschiedene Tröpfchengrößen die entsprechenden Intensitätsverläufe über dem Streuwinkel. Es handelt sich um Kurven für Monodispersionen, d.h. Ansammlungen gleichgroßer Tröpfchen, bei denen die Tröpfchenzahl als Multiplikator der Streuintensität wirkt, weil Lichtenergien sich einfach addieren. Die Darstellung ist relativ. Alle Intensitäten sind auf die Intensität der Kombination dieser vier Monodispersi-

onen beim Winkel α_0 bezogen, wodurch gleichzeitig die Beleuchtungsstärke aus der Messung eliminiert wird. Der Meßort der Bezugsintensität wird so nah wie möglich zur Vorwärtsrichtung der Beleuchtung gewählt, da dort das gebeugte Licht am stärksten ist. Es handelt sich bei allen vier Monodispersionen im Grunde um die gleiche, abklingende, periodische Funktion, die in Vorwärtsrichtung, $\alpha = 0$, ihr absolutes Maximum aufweist und zu größeren Streuwinkeln hin mehrere Minima und Maxima durchläuft, deren Abstand allerdings reziprok zum Durchmesser des beugenden Hindernisses wächst. Sie ist also umso weiter auseinandergezogen, je kleiner der Tröpfchendurchmesser ist, so daß bei den kleinen Tröpfchen nur der abfallende Zweig des ersten Maximums sich flach über den ganzen Meßwinkelbereich erstreckt, während bei den größten Tröpfchen noch drei Minima sichtbar werden. Andererseits wächst die Stärke des Beugelichtes proportional zur Hindernisfläche, so daß die zwanzig größten Tröpfchen ein stärkeres Signal als die 4500 kleinsten erzeugen. Die strichpunktierte Kurve gibt das Gesamtstreulicht einer Tröpfchenansammlung wieder; in der die vier Gruppen vereinigt sind. Die Optima sind infolge der Superposition verschwunden, während noch Knicke beobachtet werden, die auch nicht mehr auftreten, wenn es sich um kontinuierliche Polydispersionen handelt. Zu den fünf angegebenen Dispersionen wurden geplottete und photographisch verkleinerte Kreisfleckdispersionen als Testbilder auf Filmmaterial hergestellt, mit denen die Streulichtmeßanlage geprüft wurde. Sowohl für die Monodispersionen als auch für die Kombination ergaben sich nur unbedeutende Abweichungen von den theoretischen Intensitätsverläufen. Bei Polydispersionen, d.h. tatsächlichen Sprühnebeln, ändert sich, wie in Bild 1 gezeigt, die Tröpfchenanzahl entsprechend der Verteilungsfunktion stetig mit dem Tröpfchendurchmesser, so daß das Gesamtstreulicht bei jedem Streuwinkel durch Integration über den Durchmesserbereich berechnet werden kann, Gl.(7) auch wenn nur die relative Tröpfchenhäufigkeit als Funktionswert bekannt ist, denn die Gesamtzahl der Tröpfchen kürzt sich bei der Verhältnissbildung der Streuintensitäten zur Elimination der Beleuchtungsstärke ebenfalls heraus.

$$\frac{I(\alpha)}{I(\alpha_0)} = \frac{\int_0^{n_{\max}} n'(D) I(\alpha, D) dD}{\int_0^{n_{\max}} n'(D) I(\alpha_0, D) dD} \quad (7)$$

In Bild 3 sind einige Intensitätsverläufe, die bei der Lichtbeugung an Polydispersionen mit den Parametern Sauterdurchmesser D_{32} und Durchmesser Verhältnis x_h zu erwarten sind, dargestellt, wobei auf die bei der jeweiligen Verteilung beim kleinsten Winkel des Meßbereichs einfallende Gesamtintensität bezogen ist. Hierbei steht an der Abzisse stellvertretend für den Winkel α ein Radius r , was sich aus einer Winkelbeziehung ergibt, die bei der Beschreibung der Meßanlage erläutert werden wird.

Wie Bild 3 zeigt, spiegeln sich die Parameter der Verteilungen in den Streulichtverläufen wieder, der Sauterdurchmesser allerdings wesentlich deutlicher als die Lage des häufigsten Durchmessers im Tröpfchenspektrum. Bei grober Zerstäubung, z.B. $D_{32} = 100 \mu\text{m}$, ergibt die Variation dieses Parameters nur noch ein schmales Feld. Bei der Ermittlung der zu einem gemessenen Streulichtverlauf gehörigen Parameter der Tröpfchengrößenverteilung kann das Gleichungssystem nicht nach diesen aufgelöst werden. Stattdessen werden sie in einem Vergleich des gemessenen mit vielen theoretisch berechneten Verläufen gesucht. Für 2800 verschiedene Parameterkombinationen sind die Profile mit je 15 Meßpunkten in einer Datei abgespeichert, was eine gute Approximation erlaubt. Der Vergleich wird nach der Gauß'schen Methode der kleinsten Summe der Fehlerquadrate ausgeführt. Die Datei wird hinsichtlich des Parameters D_{32} zunächst in großen, bei der Verfolgung des Zieles aber immer kleiner werdenden Schritten abgetastet. Hierbei wird bei jedem D_{32} eine gleichartige Einkreisung im Feld des zweiten Parameters, der Lage des Häufigkeitsmaximums x_h , durchgeführt. Neben dem Suchresultat wird die relative Unsicherheit der Gesamtmessung als Approximationsqualität ausgedruckt. In der Datei sind die Funktionswerte für konkrete

Stützpunkte der Parametergrößen abgespeichert. Theoretisch wäre eine Schlußinterpolation zur Bestimmung der meist zwischen die Stützpunkte fallenden, genauen Parameterwerte angebracht. Hierauf wird jedoch verzichtet, weil das Stützpunktnetz der Parameterwerte so eng gespannt werden kann, daß in Anbetracht der erzielbaren Gesamtgenauigkeit eine weitere Suche nach Zwischenwerten nicht mehr sinnvoll ist. Die Festlegung des Stützpunktnetzes wird empirisch den Meßaufgaben angepaßt. Bild 4 zeigt ein Ergebnisprotokoll mit vier Approximationen von gemessenen Intensitätsverläufen durch die ausgezogenen, theoretischen Kurven.

2.2 O p t i s c h e M e ß a n l a g e z u r p u n k t f ö r m i g e n I n t e n s i t ä t s m e s s u n g: Bild 5 zeigt die Prinzipskizze einer Meßanlage für Intensitätsmessungen. Ein Helium-Neon-Laser erzeugt einen Parallelstrahl monochromatischen, kohärenten Lichtes, der in einem optischen Linsensystem auf den Meßquerschnitt aufgeweitet wird und den zu untersuchenden Sprühnebel durchleuchtet. An jedem Tröpfchen wird das Licht richtungsabhängig unterschiedlich stark gebeugt. In die Vorwärtsrichtung und eng benachbarte Richtungen erfolgt die stärkste Lichtstreuung. Ein Teil des Streulichtes tritt beispielsweise unter dem Winkel α aus dem Sprühnebel aus. Die Meßaufgabe besteht darin, die Intensität des gebeugten Lichtes richtungsabhängig zu messen. Zu diesem Zweck wird das Licht durch eine Sammellinse geschickt, die das aus Richtung α auf sie auftreffende Licht auch unter dem Winkel α in die Brennebene fokussiert. In dieser kennzeichnet der Abstand r des Brennpunktes vom Durchgangspunkt der optischen Achse den Streuwinkel α . Auf der optischen Achse überstrahlt der Brennfleck des Original-Laserstrahls das dorthin gebeugte Licht, dessen Intensität deshalb nicht gemessen werden kann. In allen übrigen Punkten der Brennebene läßt sich die Streulichtintensität mit Hilfe eines Photometers mit kleiner Eintrittspupille aufnehmen, wobei dieses senkrecht zur optischen Achse verschoben, und sein Weg als Maß für α registriert wird. Um ein ausreichendes Auflösungsvermögen bezüglich des Streuwinkels zu erhalten, benötigt man eine Sammellinse mit großer Brennweite und ein Photometer mit sehr kleiner Eintrittsöffnung, etwa von 0,1 mm Durch-

messer. Dementsprechend wird das Meßsignal besonders gegen Ende des Winkelbereichs ziemlich schwach und kann nur noch mit einem hochempfindlichen Photomultiplier gemessen werden, wobei der einne Eintrittsstrahl innerhalb des Photometers künstlich auf die Größe der Empfangskathodenfläche aufzuweiten ist, da die Photometerbox bei der langen Brännweite der Linse sonst zu lang werden würde. Trotz dieser Umstände läßt sich diese Anlage aber befriedigend ausführen und betreiben. Jedoch, wenn man nicht nur punktförmig die Intensitäten sondern die Energie des keulförmig ausgestreuten Gesamtlichtes mißt, gibt es Möglichkeiten, meßtechnisch einfachere und empfindlichere Anordnungen zu benutzen.

2.3 A n o r d n u n g e n z u r E r f a s s u n g d e r G e s a m t s t r e u l i c h t e n e r g i e: Jedes Tröpfchen beugt das Licht symmetrisch zur Richtung des Beleuchtungsstrahles so daß alle Punkte die in der Brennebene auf dem Kreis r um die optische Achse herum liegen, zum gleichen Beugewinkel α gehören. Auf schmalen Ringflächen kann man daher die gesamte unter einem Winkel gebeugte Energie aufnehmen, die dem Produkt Intensität mal differentieller Ringfläche entspricht, so daß also gerade bei größeren Winkeln, wo die Intensität schwach ist, das Signal sehr verstärkt wird. Wir haben früher Messungen mit Serien von Ringspaltblenden durchgeführt [3] und Swithenbank benutzt eine Spezialfotodiode mit 32 separaten, halbringförmigen Empfangsflächen [5]. Ein weiterer Vorteil ist, daß die laufende Winkel- bzw. Wegmessung entfällt, da die Meßorte ein- für allemal festliegen. Gleichung (8) gilt für den Verlauf der differentiellen Streulichtenergie, abhängig vom Radius des Meßkreises in der Brennebene der Sammellinse. Es ergeben sich Verläufe, die den Einfluß der

$$\frac{dE(r)}{dE(r_0)} = \frac{\int_0^{D_{\max}} n'(D) r I(r, D) dD}{\int_0^{D_{\max}} n'(D) r_0 I(r_0, D) dD} \quad (8)$$

Parameter des Tröpfchenspektrums deutlicher zeigen als die Intensitätsverläufe [9]. Das Verfahren setzt jedoch eine äußerst

präzise Aufnahmetechnik voraus, entweder mit Hilfe einer Spezialfotodiode, bei der die getrennten, ringförmigen Empfangsflächen in Durchmesser, Breite und Homogenität sehr genau gefertigt sind, oder mit Hilfe einer normalen Fotodiode, vor die nacheinander ebenso hochgenaue Ringschlitzblenden gebracht werden.

Bild 6 zeigt dagegen eine Aufnahmeapparatur, bei der nicht auf schmalen Ringflächen gemessen wird, sondern wo eine Schaltautomatik nacheinander 15 verschieden große Lochblenden vor die Empfangsfläche einer hochlinearen Fotodiode stellt und jeweils die ankommende Gesamtstreulichtenergie aufnimmt, die in den Kegel mit dem Öffnungswinkel 2α hineingestreut wird. Der Kegel hat die jeweilige Blendenöffnung als Grundfläche und die Brennweite der Sammellinse als Höhe. Da die Blendenöffnungen sich leicht sehr genau herstellen lassen, wird mit dieser einfachen Anordnung sehr genau die Integralkurve der zu den verschiedenen Winkeln gebeugten Energie aufgenommen, die ebenfalls, wenn auch schwächer als der differentielle Energieverlauf durch die Parameter der Tröpfchenverteilung gekennzeichnet ist. In einem Sprühnebel scheinen besonders die feineren Tröpfchen häufig wolkenartig durchzuziehen, infolgedessen das Beugelicht besonders bei den größeren Meßwinkeln des Bereichs, also bei den großen Blenden, erheblich schwankt. Deshalb werden in jeder Blendenstellung 10 Meßwerte auf Lochstreifen genommen, und bei der Auswertung wird der Mittelwert verwendet.

$$\frac{E(r)}{E(r_0)} = \frac{\int_0^r \int_0^{\eta_{\max}} n'(D) r I(r,D) dD dr}{\int_0^{r_0} \int_0^{\eta_{\max}} n'(D) r I(r,D) dD dr} \quad (9)$$

Die integrierten Energieverläufe ergeben sich nach Gl. (9) und sind in Bild 7 dargestellt. Die Abhängigkeit vom Parameter x_h erscheint zum Teil noch schwächer als bei den Intensitätsverläufen. Im allgemeinen wird er aber bei der Auswertung auf dem Rechner ziemlich sicher gefunden, weil diese im Verein mit der Meßanordnung eine hohe Auflösung aufweist.

2.4. Meßfehler und Daten der Anlage:

In Bild 8 wird am Beispiel eines Auswerteprotokolls gezeigt, wie integrierte Energieverläufe durch Meßwerte approximiert werden, wodurch sich schätzungsweise der Sauterdurchmesser auf 3 bis 6 Prozent und der häufigste sowie der maximale Durchmesser auf 7 bis 15 Prozent genau ermitteln lassen. Die Versuchsergebnisse werden im weiteren hauptsächlich durch die Verläufe dieser charakteristischen Tröpfchendurchmesser dargestellt. Daneben kann für jeden Betriebszustand eines Zerstäubers die relative Häufigkeitsverteilung angegeben werden. Die Daten der verwendeten Meßanlage sind: ein 0,5 mW-Helium-Neon-Laser mit Strahlaufweitung 1:25 auf 20 bis 25 mm ϕ , eine Sammellinse mit 300 mm Brennweite, sowie eine Fotodiode mit 12 mm Kathodendurchmesser. Der kleinste Tröpfchendurchmesser, der in den theoretischen Streulichtprofilen berücksichtigt wird, beträgt 1 μ m, der größte 2,5 mm. Die Entwicklung des Auswerteprogramms führte z.B. durch Hinzunahme immer kleinerer Tröpfchen zu diesen Grenzen ebenso wie zu dem Bereich von 3 bis 40 Prozent für das Verhältnis des häufigsten zum maximalen Tröpfchendurchmesser. Das Verfahren erfordert, daß der Nebel nicht allzu dicht ist. Etwa 30 % der Beleuchtungsenergie sollen ungebeugt durch ihn hindurchtreten. Bei sehr großen Düsen muß man daher mit Hilfe von geeigneten Sonden Scheiben aus dem Nebel ausschneiden z.B. [6], wodurch sich auch eine annähernd lokale Meßweise ergibt.

Folgende Fehlerquellen kommen hauptsächlich in Betracht: Aus-scherung der zu messenden Größenverteilung aus der angenommenen Gesetzmäßigkeit, inhomogene Intensitätsverteilung im Beleuchtungsstrahl, Doppel- und Mehrfachbeugung, Reflektionen, Lichtbrechung, Optikfehler, Inhomogenität der Kathodenfläche, Staub, instationäres Verhalten der Beleuchtung, der Aufnahmegerate und des Sprühnebels selbst etc. Bei Reduzierung des Meßstrahlquerschnitts auf 10 mm ϕ mittels Lochblende bleiben die Meßergebnisse trotz des inhomogenen Intensitätsprofils im Laserstrahl in etwa erhalten.

3. Versuchsergebnisse

3.1 Druckzerstäuber und Luftstromzerstäuber mit Drall. Soweit Vergleichsergebnisse vorliegen, werden mit dem Verfahren im allgemeinen etwas kleinere mittlere Tröpfchengrößen gemessen als mit anderen Methoden. Das mag daran liegen, daß alle kleinen Tröpfchen bis herunter zu $1\text{ }\mu\text{m}$ berücksichtigt werden. In Bild 9 sind die Sprühcharakteristiken von zwei kleinen Ölbrennerdüsen, die Kerosin zerstäuben, dargestellt. Im oberen Durchsatzbereich weisen die Düsen eine sehr feine enge Zerstäubung auf, bei der häufigster, maximaler und mittlerer Durchmesser dicht beieinander liegen. Mit abnehmender Brennstoffmenge wächst vor allem der maximale Durchmesser stark an, bleibt aber mit etwa $100\text{ }\mu\text{m}$ durchaus noch im Rahmen des Brauchbaren. Bei diesen feinen Sprühnebeln weisen die Streulichtenenergieverläufe, wie in Bild 7 gezeigt, kleinste Unterscheidbarkeit hinsichtlich des x_h -Parameters auf. Das mag die Ursache für die relativ starke Streuung der Meßpunkte um die mittleren Kurvenverläufe sein. In einem schmalen Betriebsbereich liefern die Druckzerstäuber mit Drall eine sehr gute Sprühnebelqualität, wobei aber die Brennstoffverteilung auf die Luft erst nach der Zerstäubung und oft nicht gleichmäßig genug erfolgt.

Im Auftrage eines Triebwerksherstellers haben wir eine Reihe von rotationssymmetrischen Luftstromzerstäubern verschiedener Bauart, Größe und Auslegung untersucht, die mit unterschiedlichen, aber immer wesentlich kleineren als den stoechiometrischen Luft-Brennstoffverhältnissen betrieben werden. Der Treibluft wird stets ein Drall erteilt, mit dem sie den ebenfalls mit Drall eintretenden Brennstoff über eine rotationssymmetrische Abreißkante treibt. Generell kann gesagt werden, daß bei diesem Prinzip abhängig vom Treibluft-Brennstoffverhältnis eine brauchbare Zerstäubung nicht unter 0,1 bis 0,2 bar Treibluftdruck erreicht wird. Bild 10 zeigt die Zerstäubungsgüte bei einem dieser Luftstromzerstäuber abhängig von Brennstoffdurchsatz und Treibluftdruck. Im Gegensatz zu Dralldruckdüsen, die ja nur in einem wesentlich kleineren Durchsatzbereich befriedigend arbeiten, liefern die Luftstromzerstäuber in einem großen Durchsatzbereich eine gute mittlere Zerstäubungsfeinheit, einen niedrigen

Sauterdurchmesser. Nur bei sehr niedrigem Brennstoffdurchsatz und höherem Treibluftdruck ergeben sich aber gleichzeitig enge Tröpfchenspektren, das heißt kleine maximale Tröpfchendurchmesser. Ansonsten läuft die Häufigkeitsverteilung bei den untersuchten Luftstromzerstäubern zwar flach aber bei größeren Maximaldurchmessern aus. Im vorliegenden Beispiel bleiben sie bei Treibluftdrücken über 0,2 bar bei mittleren Durchsätzen noch unter 400 μm , während sie bei 40 l/h schon bis auf 800 μm anwachsen. Bei Treibluftdrücken zwischen 0,05 und 0,2 bar wird bei allen Durchsätzen außer dem niedrigsten ein starker Ausschlag des maximalen Durchmessers verzeichnet. Analog zu einem später dazulegenden Sachverhalt bei einem ebenen Luftstromzerstäuber kann man vermuten, daß bei diesen Betriebszuständen Treibluft und Brennstoff sich innerhalb des Zerstäubers nicht optimal begegnen.

3.2 Z e r s t ä u b u n g v o n B r e n n s t o f f i n
e i n e m e b e n e n L u f t s t r o m z e r s t ä u b e r
Dem ebenen Luftstromzerstäuber liegen folgende Gedanken zu Grunde: a) Möglichst geringer Einsatz von Luftstromenergie, damit die an der Flammrohrwand verfügbare Druckdifferenz ausreicht, um den Brennstoff genügend fein zu zerstäuben. b) Anwendung eines hohen Luft-Brennstoffverhältnisses, das bereits dem Gesamtluftüberschuß in der Primärverbrennungszone entspricht, also mehr oder weniger überstöchiometrisch ist. c) Gleichmäßige und schnellste Vermischung des Brennstoffnebels über die gesamte Treibluftmenge, damit Luft und Brennstoff vorgemischt in den Brennraum eintreten.

Beim Einströmen in den Brennraum wird der Frischluft die Mischenergie erteilt, die sie für ihre eigene Vermischung mit dem Heißgas benötigt. Es ist sinnvoll, diese Energie gleichzeitig für die Zerstäubung und Vermischung des Brennstoffes einzusetzen, anstatt diesen unter Sauerstoffmangel zu früh mit dem zähen Heißgas in Berührung zu bringen, in dem die spätere Sauerstoffzubringung erschwert ist. Aus demselben Grunde erscheint es auch nicht optimal, nur einen Teil der Verbrennungsluft im Zerstäuber zuzuführen und den Rest in der Primärzone heizumischen. Der einzige Gesichtspunkt, der dafür spräche, wäre das

vielfach praktizierte Hinausschieben der Brennkammer-Verlöschgrenze durch Nester fetten Gemisches. Die kann man aber vielleicht besser gezielt zu kritischen Betriebspunkten und an wenigen Orten einrichten, als dauernd die ganze Verbrennung damit zu belasten. Andererseits kann man durch eine gute und rasche Vorvermischung nicht nur CO und HC reduzieren sondern auch die NO_x -Bildung, indem man die Aufenthaltszeit in der Primärzone verkürzen oder zu brennstoffärmerer Gemischeinstellung übergehen darf.

Gemäß Bild 11 besteht der untersuchte, ebene Luftstromzerstäuber aus einer rechtwinklig gebogenen Düse mit rechteckigem Strömungsquerschnitt, in welche eine dünne, gekrümmte Trennwand, die mit scharfer Kante im engsten Düsenquerschnitt endet, eingebaut ist. Der Brennstoff wird auf die konkave Seite der Zwischenwand aufgespritzt und von der Luftströmung in dünnem Film über die Schneide gezogen, wobei er fein zerstäubt. Der rechteckige Kanalquerschnitt wurde gewählt, um die Forderung nach gleichmäßiger Beladung der Luft mit Brennstoffnebel leichter erfüllen zu können. Voraussetzung dabei ist, daß der Brennstoff gleichmäßig über die Schneidenlänge verteilt wird. Bei einem Luft-Brennstoff-Verhältnis entsprechend der Luftüberschußzahl $\lambda = 1,1$ wird das bei Atmosphärendruck bei einem Düsenquerschnitt von 6 mal 30 mm erst in etwa erreicht, wenn mindestens fünf bis sieben Einzelstrahlen den Brennstoff aufgeben. Der Einfachheit halber sind die Strahlen radial von der Innenkontur der Düse auf die Zwischenwand gerichtet, auf der sie sich beim Aufprall ausbreiten und als Film zur Hinterkante fließen. Bei den gegebenen Verhältnissen zieht der Film sich wieder soweit zusammen, daß nur Teilstücke der Schneidenlänge benetzt werden ganz gleich, ob man die Strahlen unter dem Winkel $\gamma = 90^\circ$ weit vorne oder unter $\gamma = 30^\circ$ weit hinten auf die Zwischenwand richtet. Die Bildserie 12 zeigt deutlich, daß bei 120 m/s Luftstromgeschwindigkeit erst bei 5 und sieben Strahlen die ganze Kanalbreite mit Brennstoff beschickt wird. Es entstehen in jedem Fall zunächst ziemlich kompakte Nebelstrahlen, die sich umso später auflösen, je geringer die Zahl der Aufspritzstrahlen ist. Wenn man den Zerstäubungsstrahl von der Seite her betrachtet, erkennt man ebenfalls, daß der Nebel sich bei mehr Brennstoffstrahlen rascher bis zum

Rand des Luftstrahles ausbreitet. Der Durchmesser der Aufspritzbohrungen beträgt bei allen Strahlanzahlen 0,3 mm. Im gegebenen Fall übt seine Variation über 0,4 bis 0,5 mm nur schwachen Einfluß aus.

Bild 13 zeigt das Zerstäubungsverhalten des ebenen Luftströmzerstäubers bei Variation der Anzahl der Brennstoffaufgabestrahlen durch gestrichelte Kurven für die Auftragung aus Wandbohrungen und durch ausgezogene Kurven für die Auftragung aus Kapillarrohren. In beiden Fällen erweist sich der Sauterdurchmesser, die mittlere Tröpfchengröße, als fast unabhängig von der Anzahl der Strahlen. Der maximale Tröpfchendurchmesser nimmt dagegen mit ihr ab, wenn Kapillarrohre den Brennstoff bis dicht an die Schneide heranführen, während er mit der Zahl der Aufgabestrahlen wächst, wenn die Aufspritzung aus Wandbohrungen erfolgt. Offenbar findet dann auf dem Weg quer durch den Luftstrom eine umso stärkere Vorzerstäubung statt, je mehr Strahlen da sind und je schwächer ihr Impuls ist. Die hierbei entstehenden Tröpfchen gelangen teilweise nicht mehr bis zur Zwischenwand, sondern werden mitgerissen und bilden die größeren Tröpfchen der Verteilung. Dieser Effekt tritt umso stärker auf, je näher zum Düsenende die freien Brennstoffstrahlen im gebogenen Düsenkanal stehen. Wie die ausgezogenen Verläufe ausweisen, wird bei Benutzung von 5 Kapillarrohren das engste Tröpfchenspektrum mit dem kleinsten Maximaldurchmesser von nur 40 μ m gemessen. Bei geringerer Anzahl von Rohrstrahlen, übt die Filmerzeugung durch hochimpulsive Senkrechtstrahlen offenbar zunehmend negativen Einfluß auf die Zerstäubung aus. Der maximale Durchmesser wächst. Im ganzen zeigt sich, daß der maximale Durchmesser wesentlich empfindlicher auf Änderungen am Zerstäuber reagiert als der Sauterdurchmesser.

Bild 14 stellt dar, daß der mit 7 Spritzröhrchen versehene, ebene Zerstäuber bei dem gewählten Luft-Brennstoffverhältnis, das bei allen Meßpunkten konstant gehalten wird, überraschend gut arbeitet. Bei den Meßkurven wurden jeweils 4 Stufen der Luftgeschwindigkeit, 60, 80, 100 und 120 m/s eingestellt. Dabei wurden die Spritzrohrstellungen zwischen $\gamma = 30^\circ$, 45° und 90° variiert, und aufgetragen ist über dem zugehörigen Treibluftdruck. Die Zerstäubungsfeinheit unterscheidet sich bei verschiedenen Spritzrohrstellungen oder Filmauftragungsorten nicht

viel. Bei $\gamma = 45^\circ$ wurden etwas feinere Sauterdurchmesser ermittelt. Festzuhalten ist aber, daß die Stellung 90° bei gleicher Luftstromgeschwindigkeit an der Schneide und gleicher Sprühnebelqualität 20 Prozent weniger Treibluftdruck braucht als die Stellung 30° , bei welcher der Kamm der Kapillarröhrchen in dem bereits stark beschleunigten Luftstrom steht. Weiter sind gegenüber den untersuchten, rotationssymmetrischen Luftstromzerstäubern mit Drall folgende Vorteile zu registrieren:

1. Es ergibt sich ein sehr feiner Sprühnebel mit einem sehr engen Größenspektrum, größere Tröpfchen werden vermieden.
- Und 2. benötigt beispielsweise der in Bild 10 dargestellte Drallzerstäuber für eine gleichgute mittlere Tröpfchengröße bei etwa doppelt so großem Maximaldurchmesser gegenüber dem ebenen Zerstäuber den dreifachen Treibluftdruck. Da das Luftbrennstoffverhältnis bei dem rotationssymmetrischen Zerstäuber allerdings kleiner ist, braucht der Energieeinsatz nicht unbedingt größer zu sein, obwohl man sich vorstellen kann, daß auch bei dem ebenen Zerstäuber die Sprühqualität nicht sofort absinken muß, wenn man die Düse senkrecht zur Schneide verkleinert, also bei gleicher Luftgeschwindigkeit die Luftmenge herabsetzt. Diese Grenze müßte noch ausgefahren werden, obwohl es, wie gesagt, garnicht erwünscht ist, das Luft-Brennstoffverhältnis herabzusetzen. Es ist durchaus möglich und wahrscheinlich, daß bei ebener Zerstäubung die Energie des Luftstromes günstiger eingesetzt ist als bei Drallerzeugung, bei der zum Beispiel der Brennstoff nicht senkrecht sondern schräg über die Schneide getrieben wird.

Zur Absolutgröße der Treibluftdruckdifferenz ist zu sagen, daß sie mit 6 Prozent des Gesamtdruckes für den Eintritt in die Brennkammerprimärzone noch etwas hoch erscheint. Da jedoch die Zerstäubungsgüte mit wachsender Luftdichte zunimmt [7], und diese am Brennkammereintritt z. Teil wesentlich höher als bei Atmosphärendruck ist, darf man erwarten, daß dann auch niedrigere Treibluftdrücke und Luftstromgeschwindigkeiten sehr gute Sprühnebel erzeugen können. Am Verdichteraustritt hat außerdem der Triebwerksluftstrom eine höhere Geschwindigkeit als für die Zerstäubung erforderlich, und es ist vielleicht sinnvoll gemäß der Skizze, Bild 15, mit ebenen Luftstromzerstäubern in getrennte

Primärluftdiffusoren zu gehen. In diesen würde der Brennstoff zerstäuben, sich mit der Luft vermischen und vorverdampfen, um beim Eintritt der Primärluft in die Primärverbrennungszone beim Durchtritt durch die dort verankerte Flammenfront sehr schnell zu verbrennen. Außerdem ergäbe sich eine verlustarme Strömungsführung durch die Brennkammer.

4. Verzeichnis der Formelzeichen

r	Tröpfchendurchmesser	μm
D_{32}	Sauterdurchmesser	μm
r_{hfgst}	häufigster Tröpfchendurchm.	μm
r_{max}	größter Tröpfchendurchm.	μm
E_0	Beleuchtungsstärke	W/cm^2
$E(r)$	Gesamtstreulichtenergie, die in der Brennebene auf der Kreisfläche vom Radius r um den Brennpunkt ankommt	W
f	Brennweite der Sammellinse	mm
I	Intensität des Streulichtes	W/cm^2
I_0	Intensität des Streulichtes in Richtung $\alpha = \alpha_0$	W/cm^2
n	Tröpfchenanzahl	-
n_0	Gesamtanzahl aller Tröpfchen	-
r	Radius in der Brennebene	mm
r_0	Radius in der Brennebene der Bezugsmeßblende	mm
r_{max}	Radius der größten Blenden- öffnung	mm
V	Brennstoffvolumen der Tröpfchen	cm^3
V_0	Gesamtvolumen aller Tröpfchen	cm^3
x	Durchmesserverhältnis D/D_{max}	-
x_h	Durchmesser $r_{\text{hfgst}}/D_{\text{max}}$	-
α	Winkel zwischen der Richtung der Beleuchtung und der des Streulichtes	min
α_0	Winkel des Bezugsstreulichtes	min
β	math. Verteilungsparameter	-
λ	Wellenlänge des Lichtes	μm
γ	Winkelstellung der Brennstoff- aufgabestrahlen beim ebenen Zerstäuber	

Literaturverzeichnis

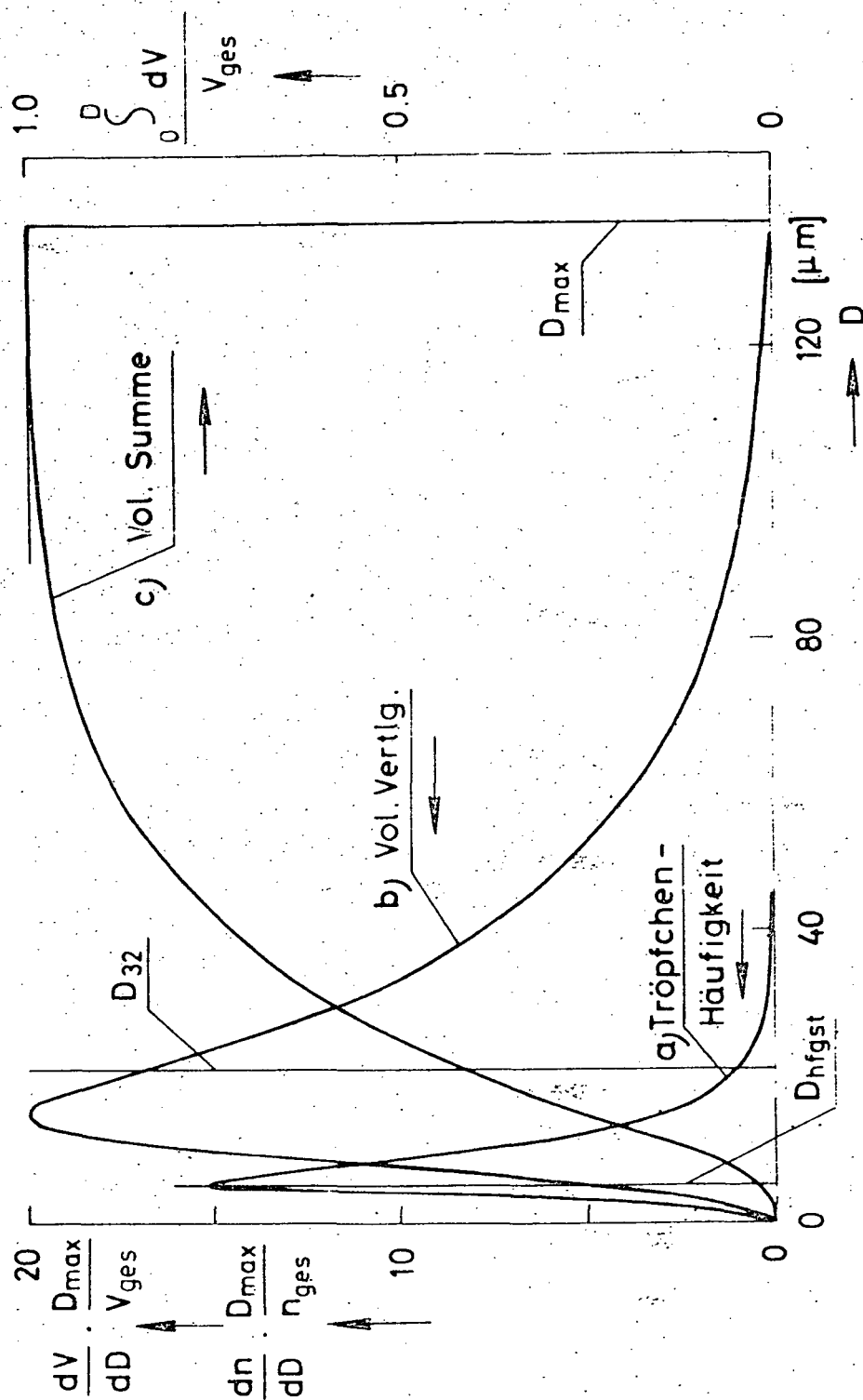
- 1 DOBBINS, R.A. CROCCO, L. GLASSMAN, J.:
Measurements of Mean Particle Sizes in Sprays from
Diffractively Scattered Light.
AIAA Journal, 1 (1963) No. 8, S. 1982
- 2 CORNILLIANT, J.:
Particle Size Analyzer
Appl. Optics, 11 (1972) No. 2, S. 265
- 3 KAYSER, A.:
Zur Ermittlung des Sauterdurchmessers von Tröpfchenver-
teilungen mit dem Streulichtmeßverfahren
DLR-Mitt. 73-20 (1973) T.1., S. 63
- 4 HUTH, U.:
Zur Messung des Sauterdurchmessers von Tröpfchenvertei-
lungen mit Hilfe der Streulichtmeßmethode
Diplom-Arbeit TH Aachen, /DFVLR-Luftstrahlantriebe, Köln
(1970)
- 5 SWITHENBANK, J; BEER, JM; TAYLOR, D.S.; ABBOT, D;
Mc CREATH, G.C.:
A Laser Diagnostic Technique for the Measurement of Droplet
and Particle Size Distribution.
Sheffield, Univ. (England) Si 380652 (Dez. 1975)
- 6 DIECK, R.H., ROBERTS, R.L.:
The Determination of the Sauter Mean Droplet Diameter in
Fuel Nozzle Sprays
Appl. Optics 9 (1970) No. 9, S. 2007
- 7 RIZKALLA, A.A., LEFEBVRE, A.H.:
The Influence of Air and liquid Properties on Airblast
Atomization.
ASME-Journal of Fluids Engg., 97, Series 1, (1975) No. 3,
S. 316.
- 8 RINKES, H.
Tropfengrößenverteilung beim Zerstäuben
Dissertation ETH Zürich Nr. 3997 (1967)

9 KAYSER, A.,:

Zur optischen Messung der Tröpfchengrößenverteilung bei
der Zerstäubung von Brennstoff.

Chemie-Ingenieur Technik 49 (1977), 10, S. 552

Bild 1 Tröpfchengrößenverteilung in einem Sprühnebel



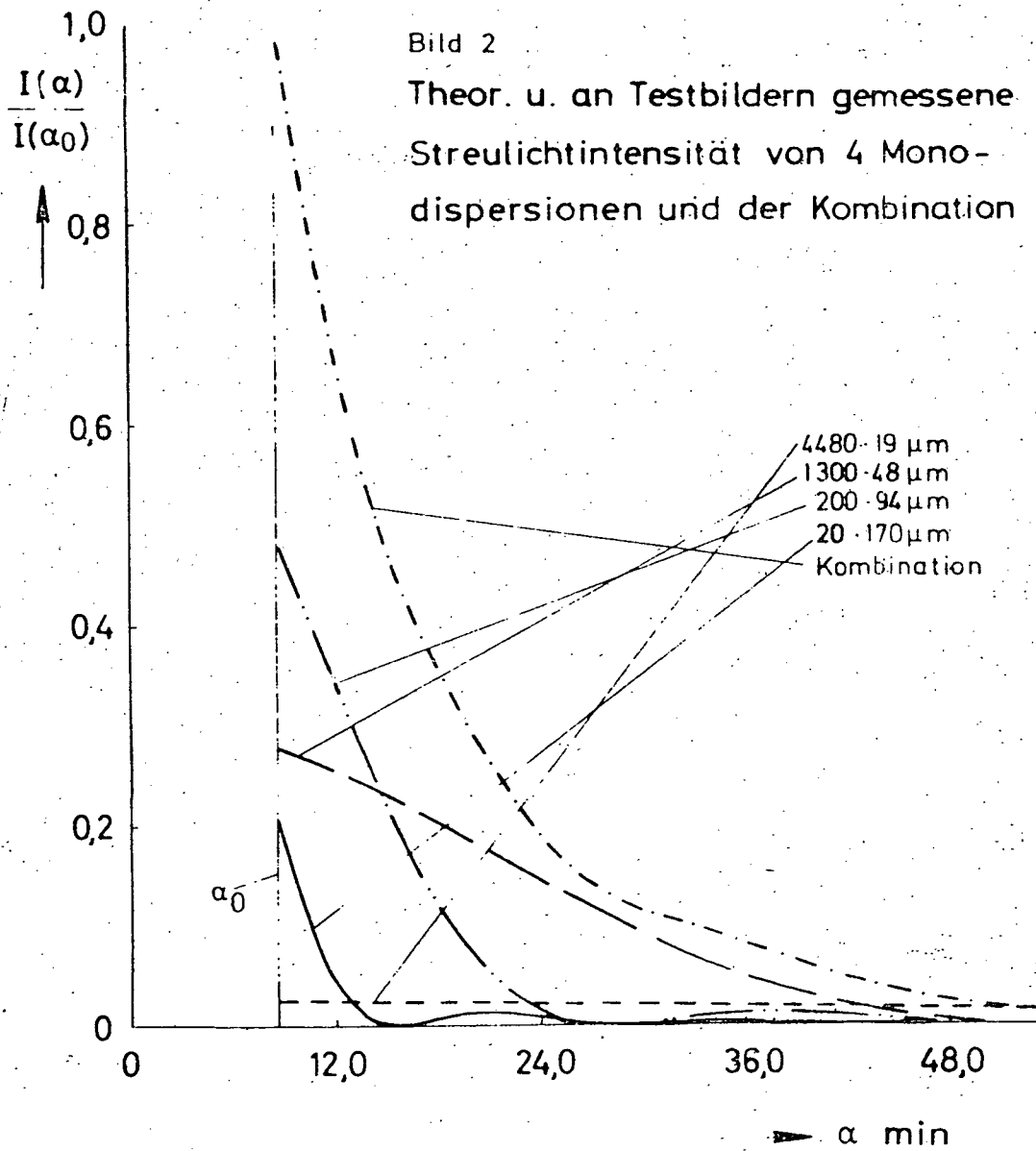


Bild 3 Rel. Streulichtintensität bei Polydispersionen abhängig von Sauterdurchmss. D_{32} u. d. Asymmetrie x_h der Verteilung

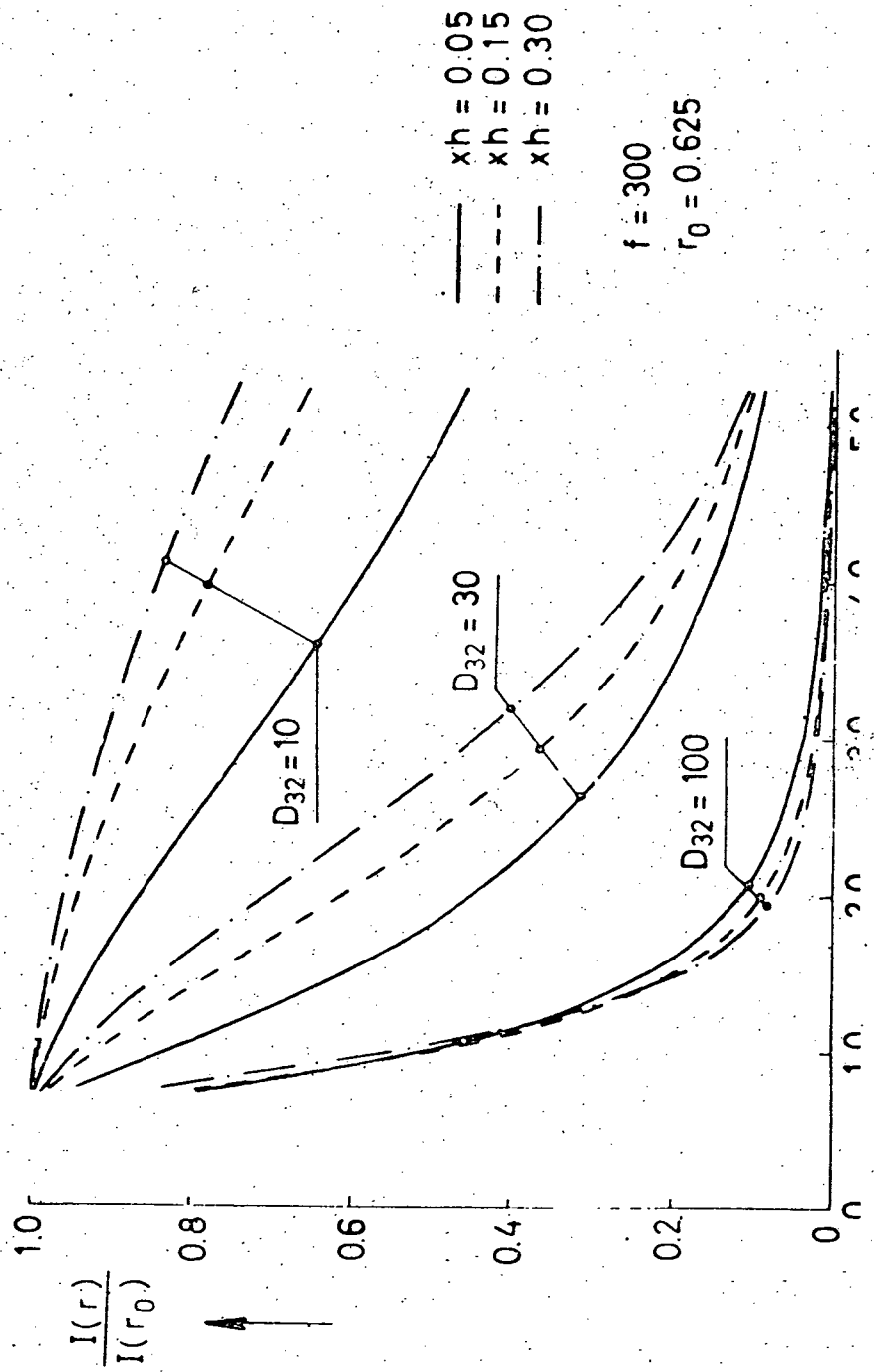


Bild 4

DFVLR - LUFTSTRAHLANTRIEBE 505 PORZ-VAHN

OPTISCHE MESSUNG DER ZERSTREUUNGSGUTE NACH DER STREULICHTMETHODE

GEMESSENE (PKTE) U. GEFUND. THEOR. VORHERBERECHN. INTENS. VERLAUFE

VERSUCH: 21 DUESE NR.: 5 DATUM: 7. 8. 1975

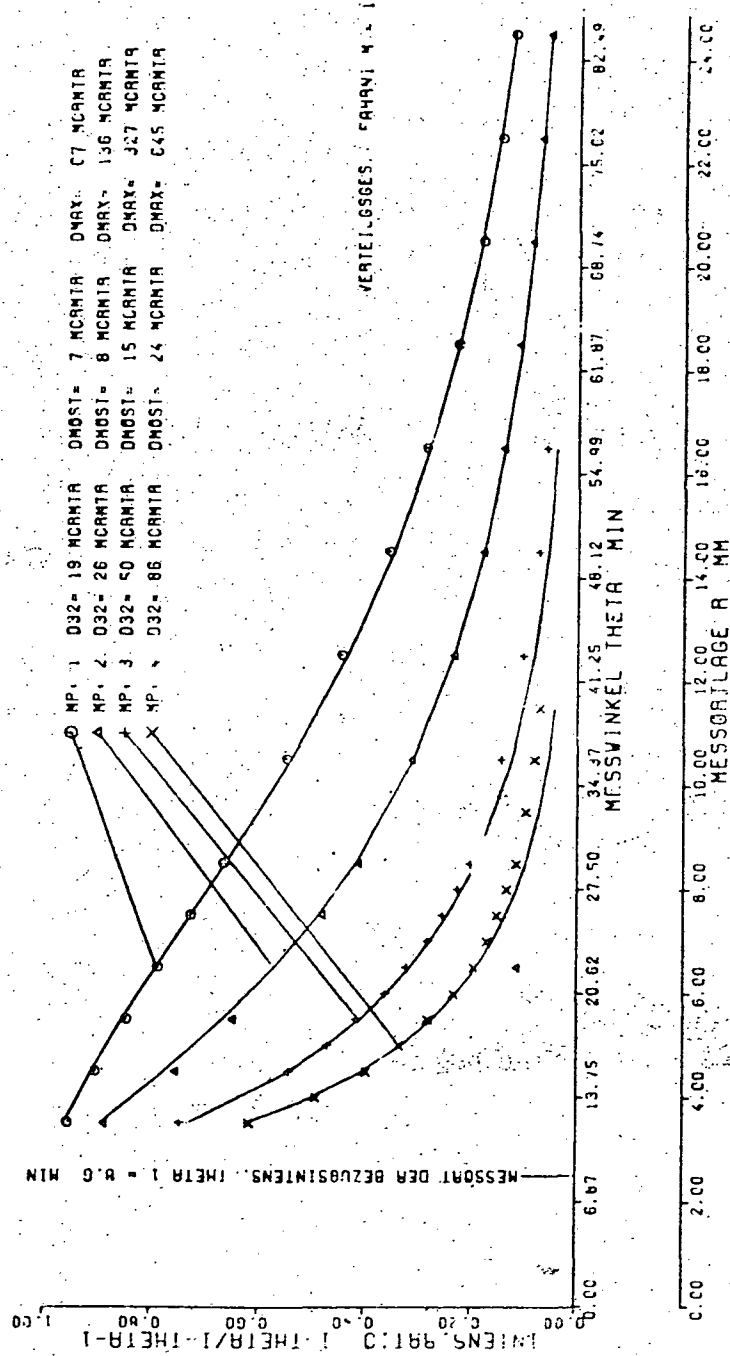


Bild 5 Anlage zur optischen Messung der Tröpfchengröße in
Zerstäubungsnebeln

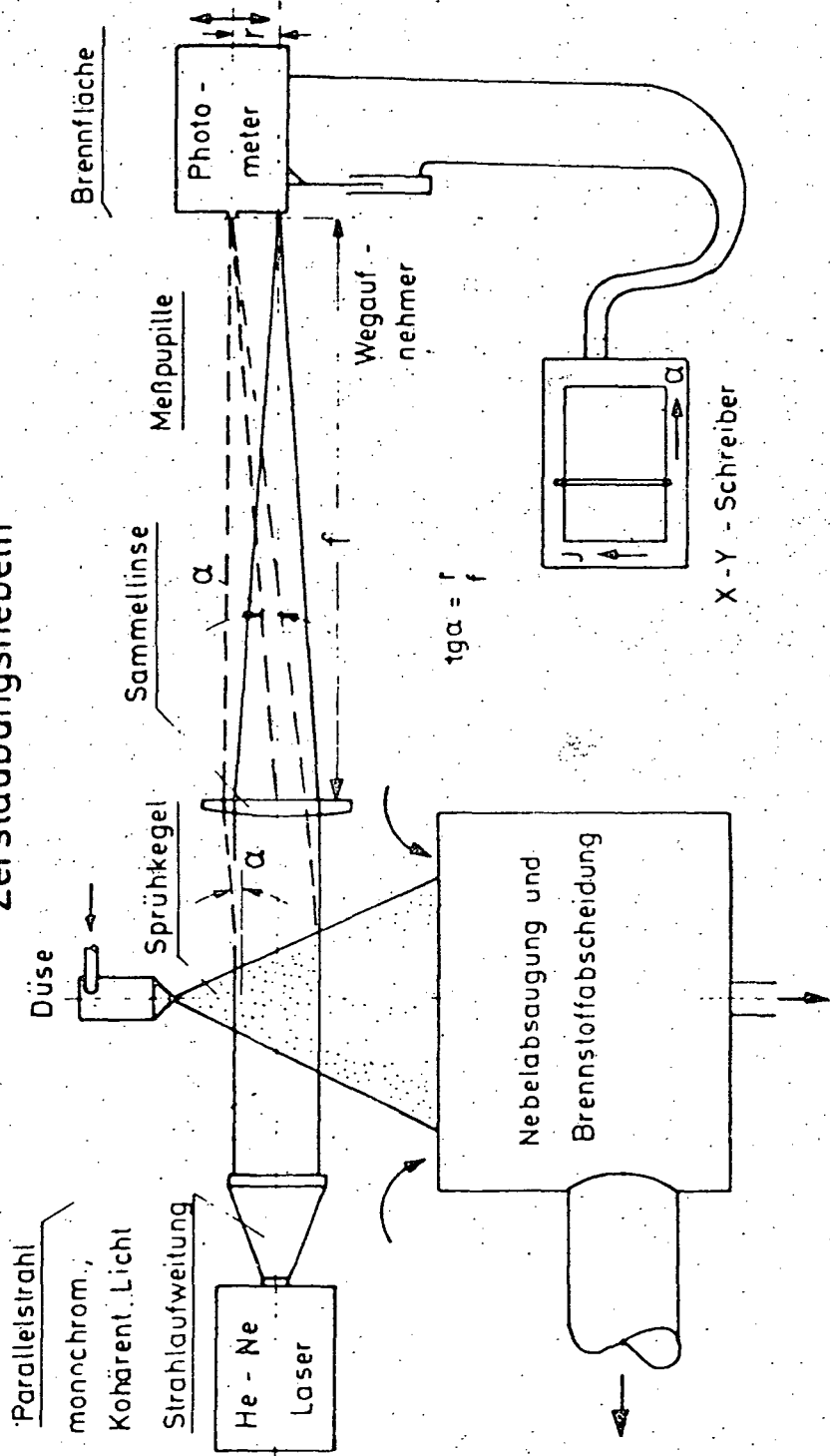


Bild 6 Messung der an verschiedenen Kreisflächen einfallenden Streulicht - energie

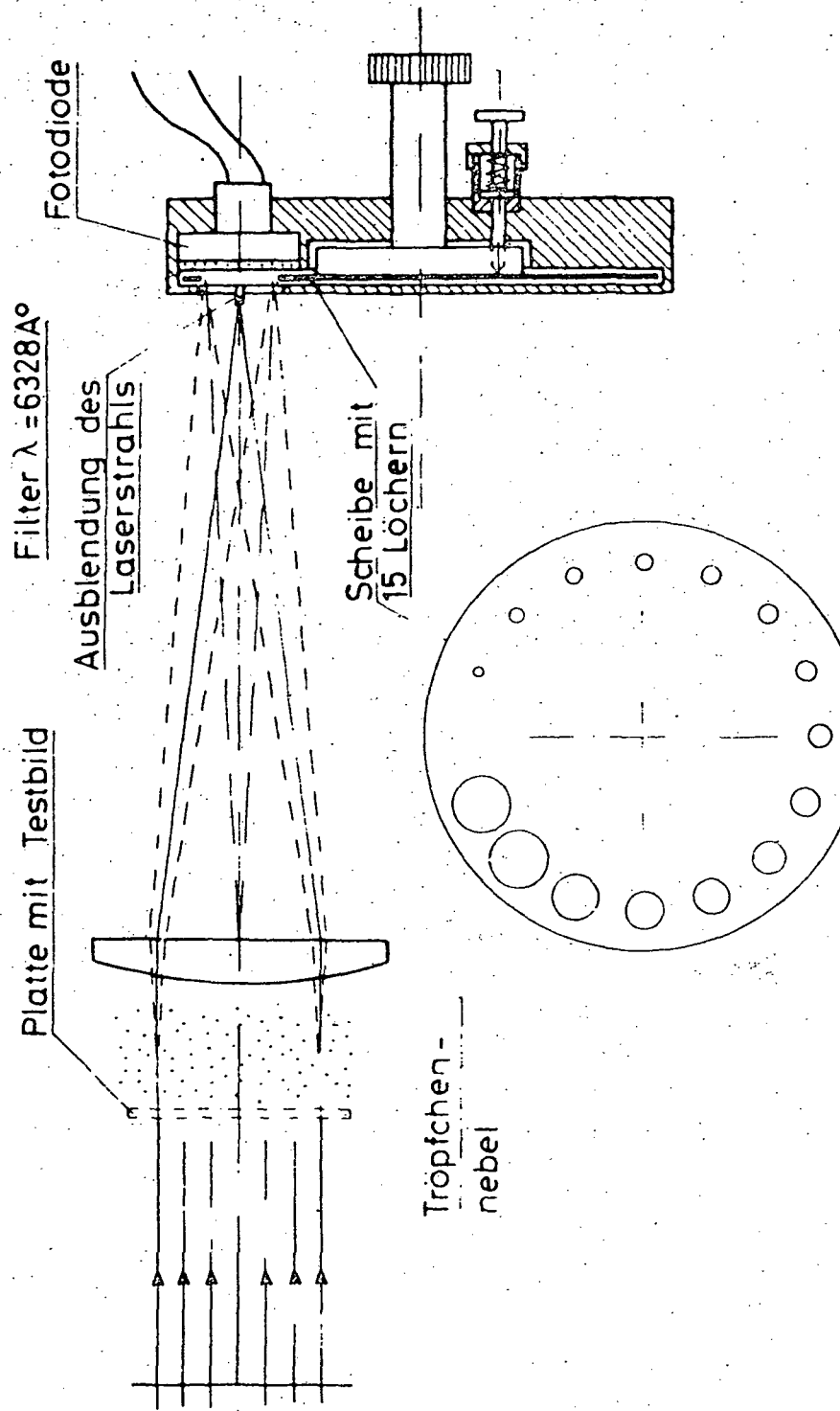
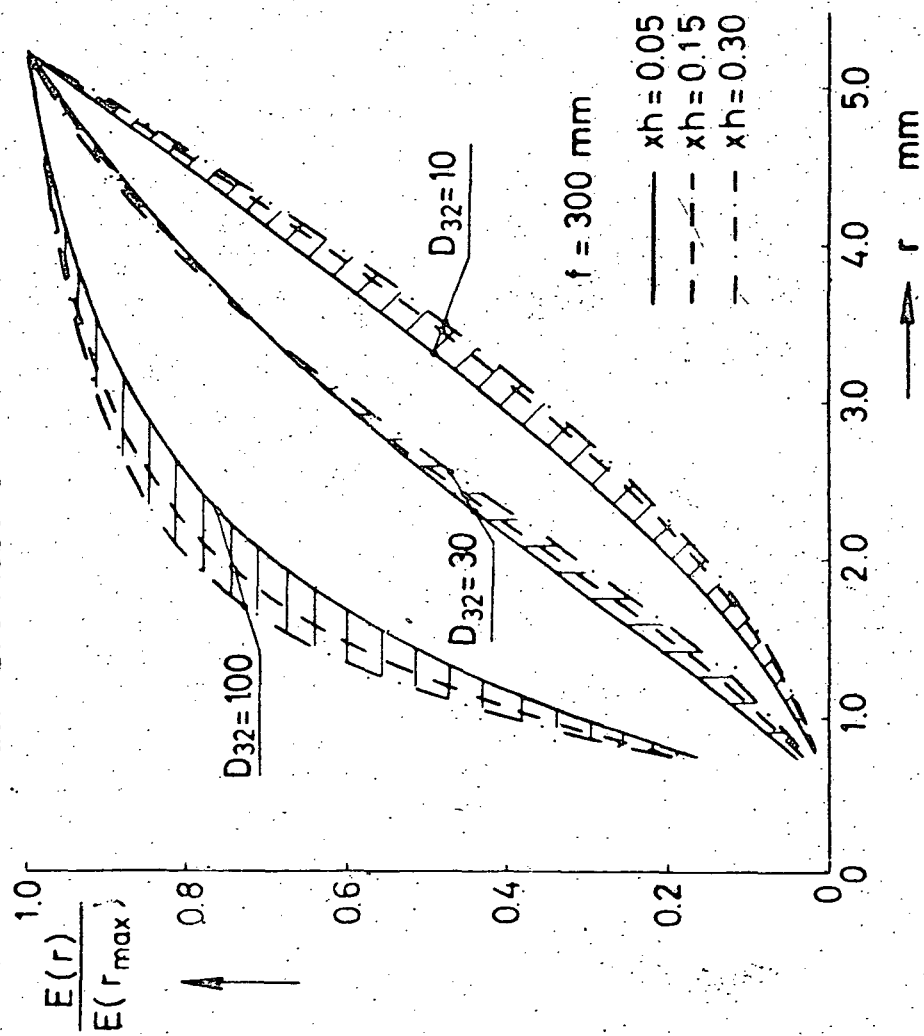


Bild 7 Gesamtstreulichtenergie auf Kreisflächen vom Radius r in der Brennebene



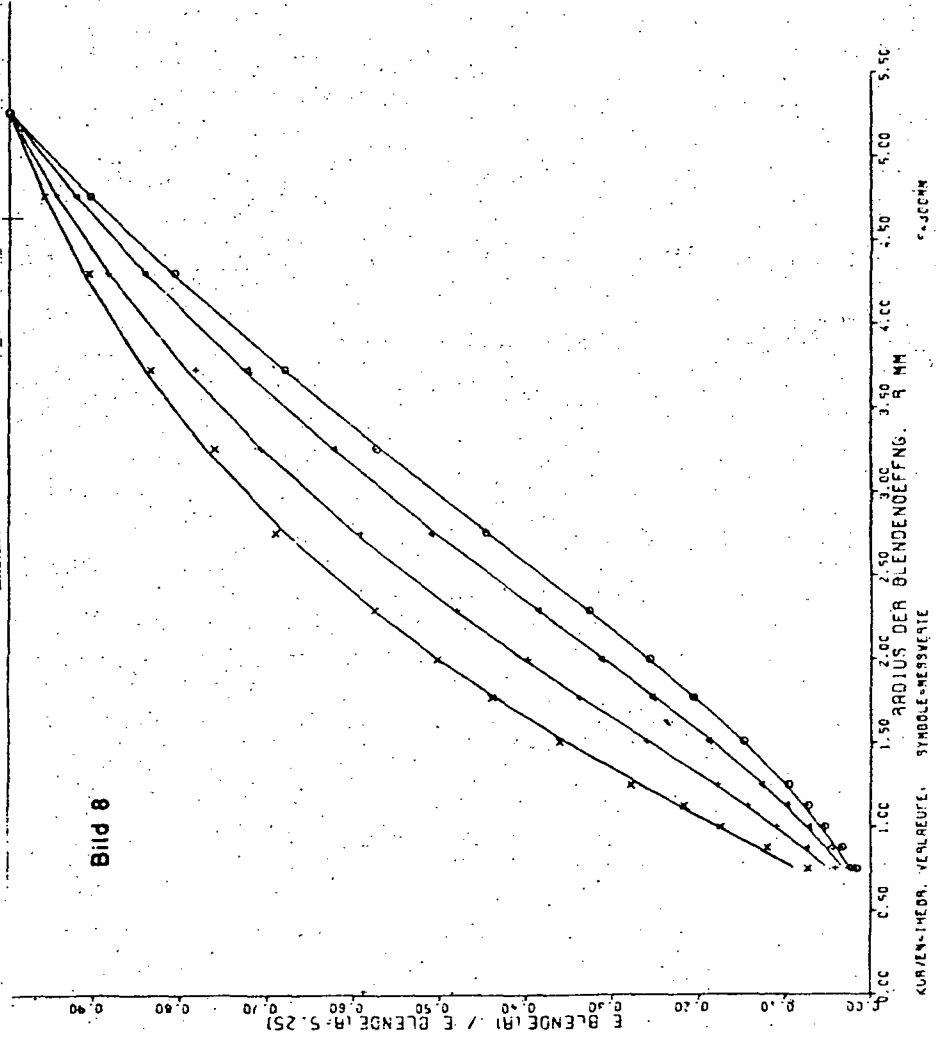


Bild 9 Zerstäubungsgüte bei zwei Drall - Druckdüsen abhängig vom Brennstoffdurchsatz

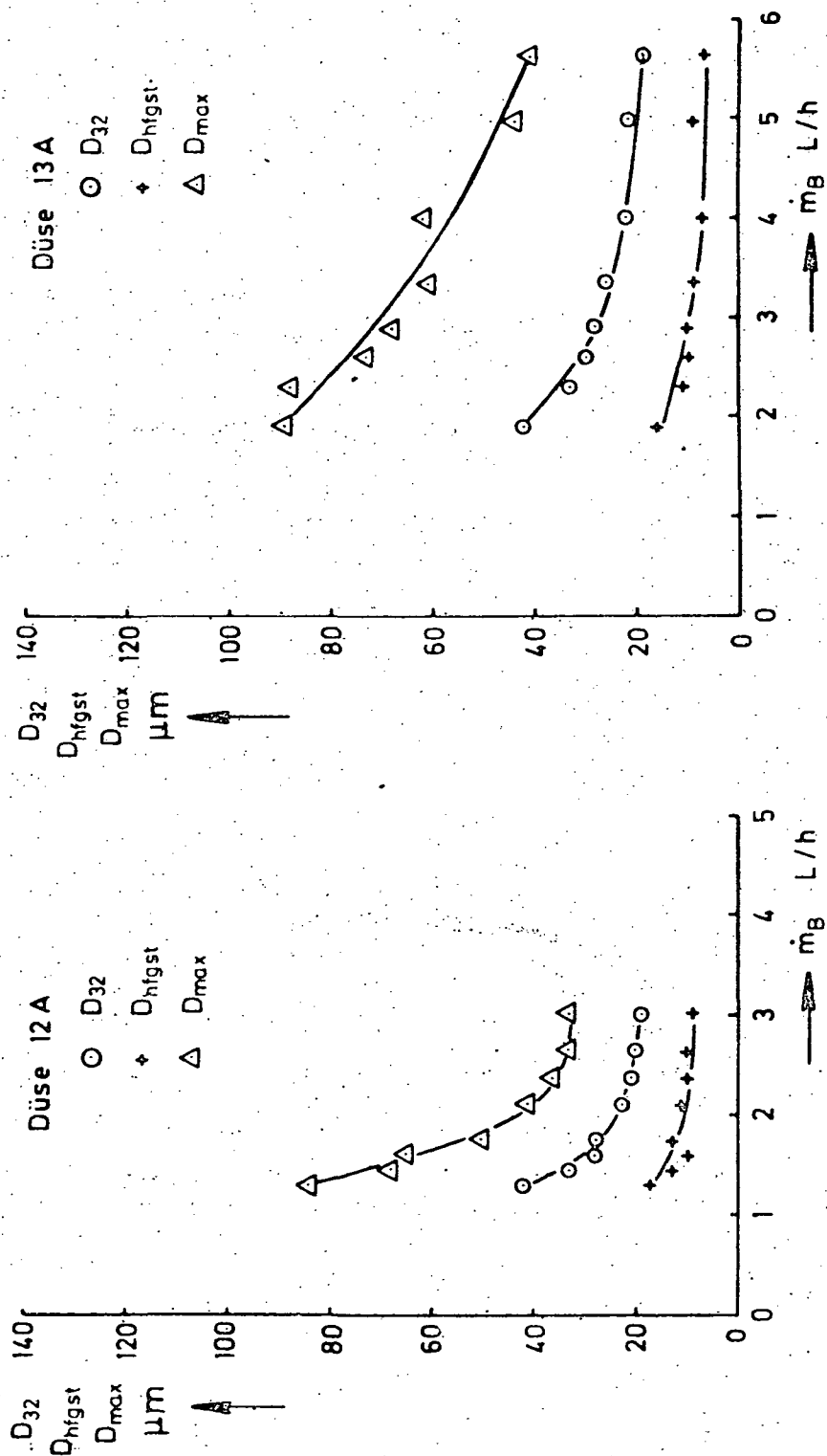


Bild 10 Zerstäubungsgüte bei einem Luftstromzerstäuber abhängig
von Brennstoffdurchsatz und Treibluftdruck

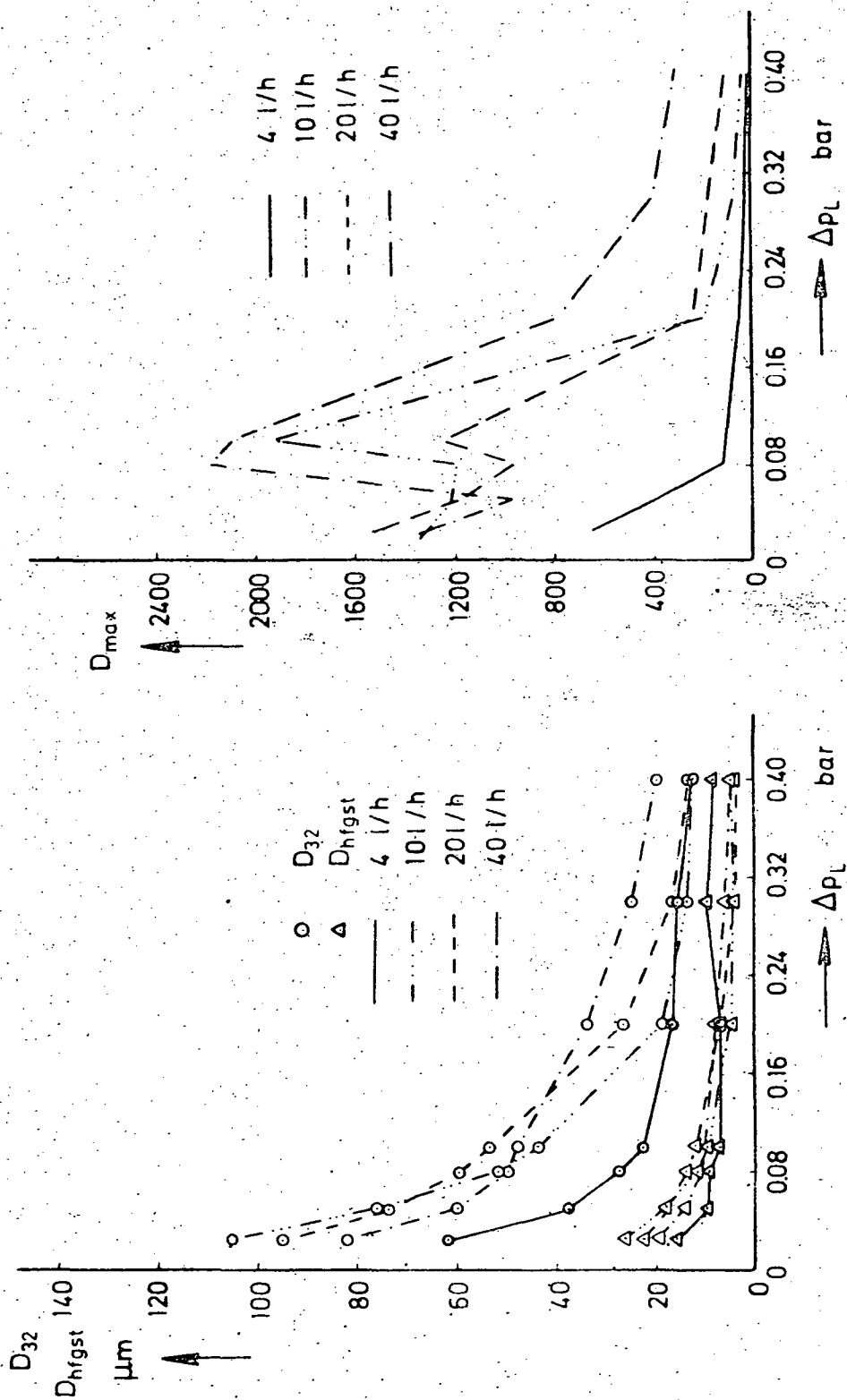


Bild 11 Ebener Luftstromzerstäuber mit drei -
strahliger Brennstoffaufgabe

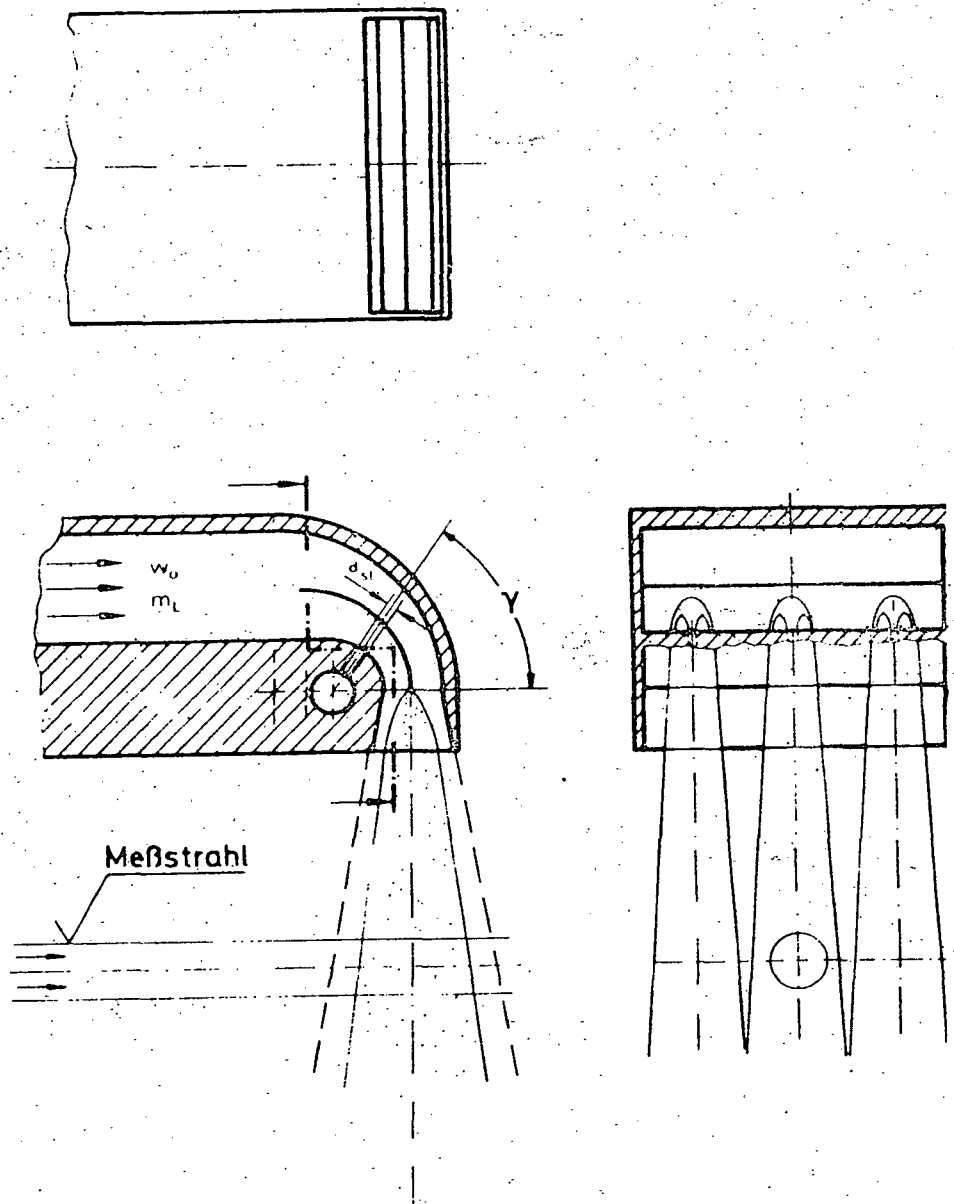
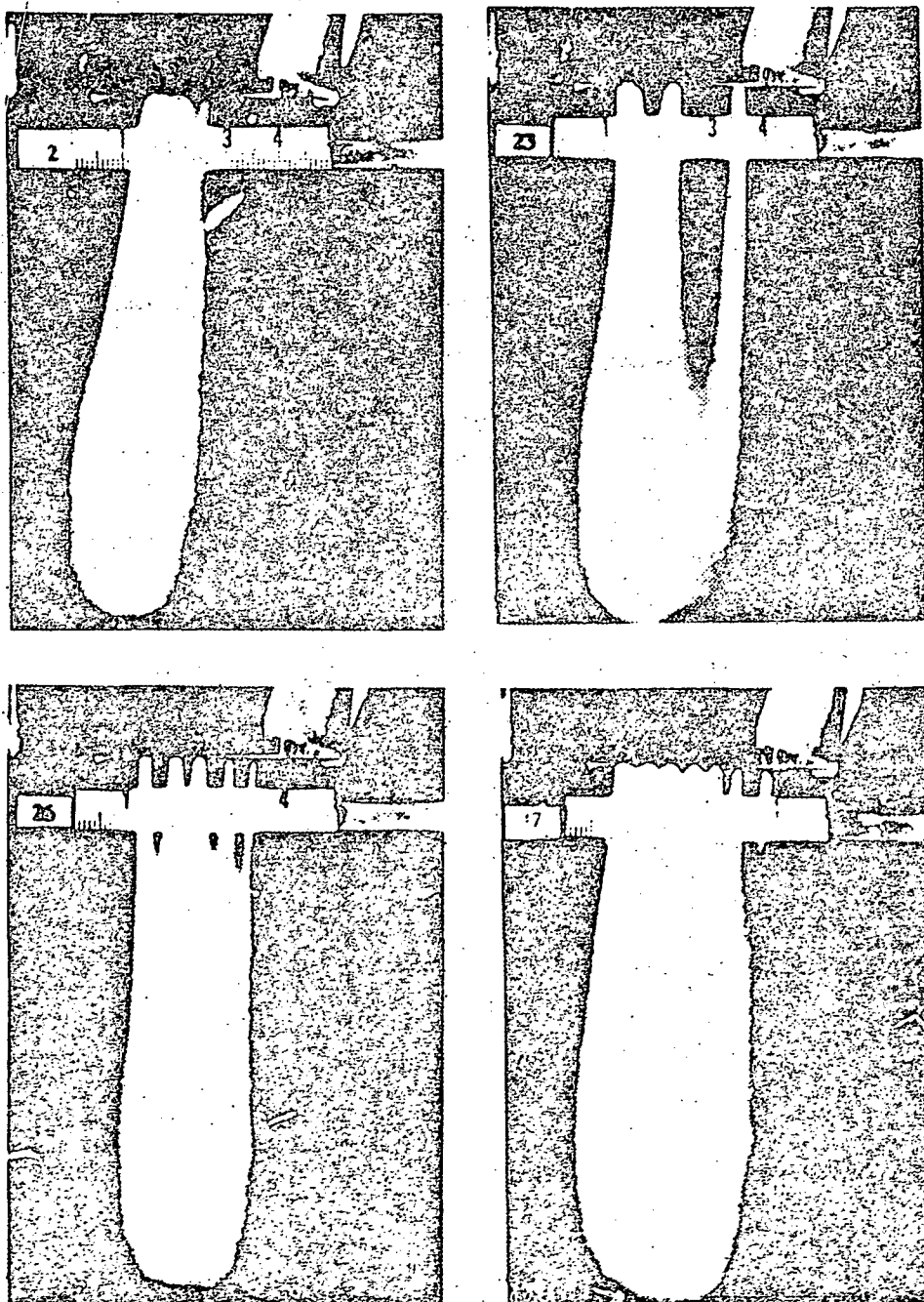


Bild 12 Verteilung des Brennstoffnebels ($\lambda = 1,1$)
über den Luftstrahl bei 1,3,5 u.7 Spritz-
bohrungen $\varnothing 0,3$, $\gamma = 45^\circ$, $w_L = 120 \text{ m/s}$



Brennstoffaufgabestrahlen

— — — aus Bohrungen \varnothing 0,3 mm

vom Treibluftdruck

($w_L = 60, 80, 100, 120$ m/s)

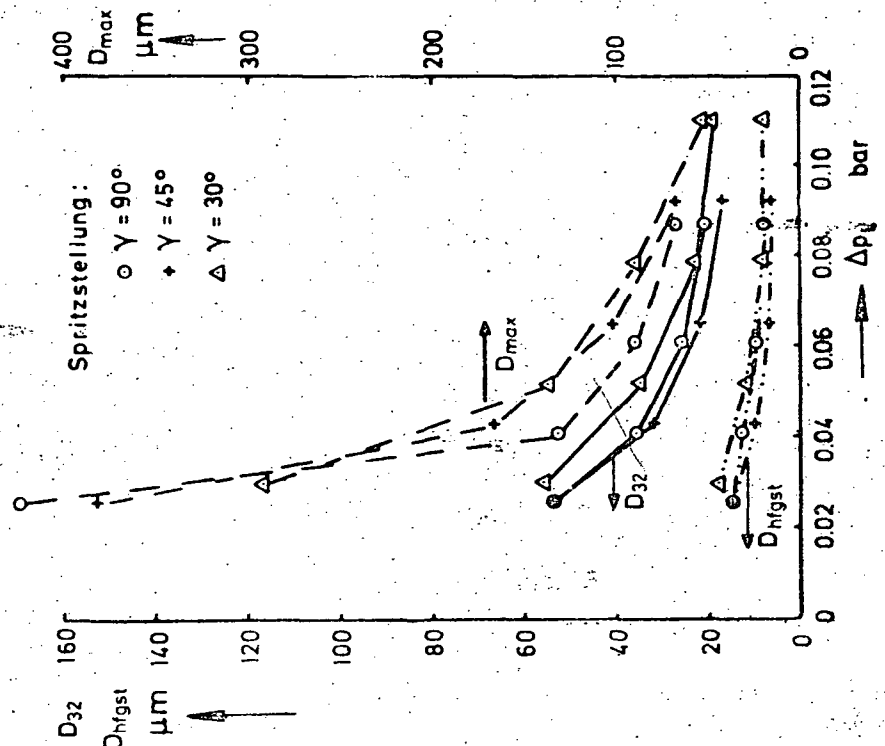
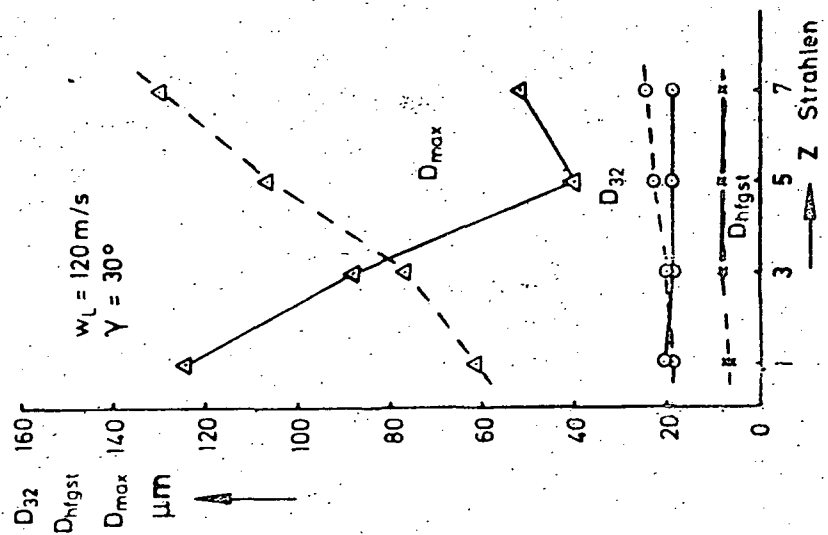
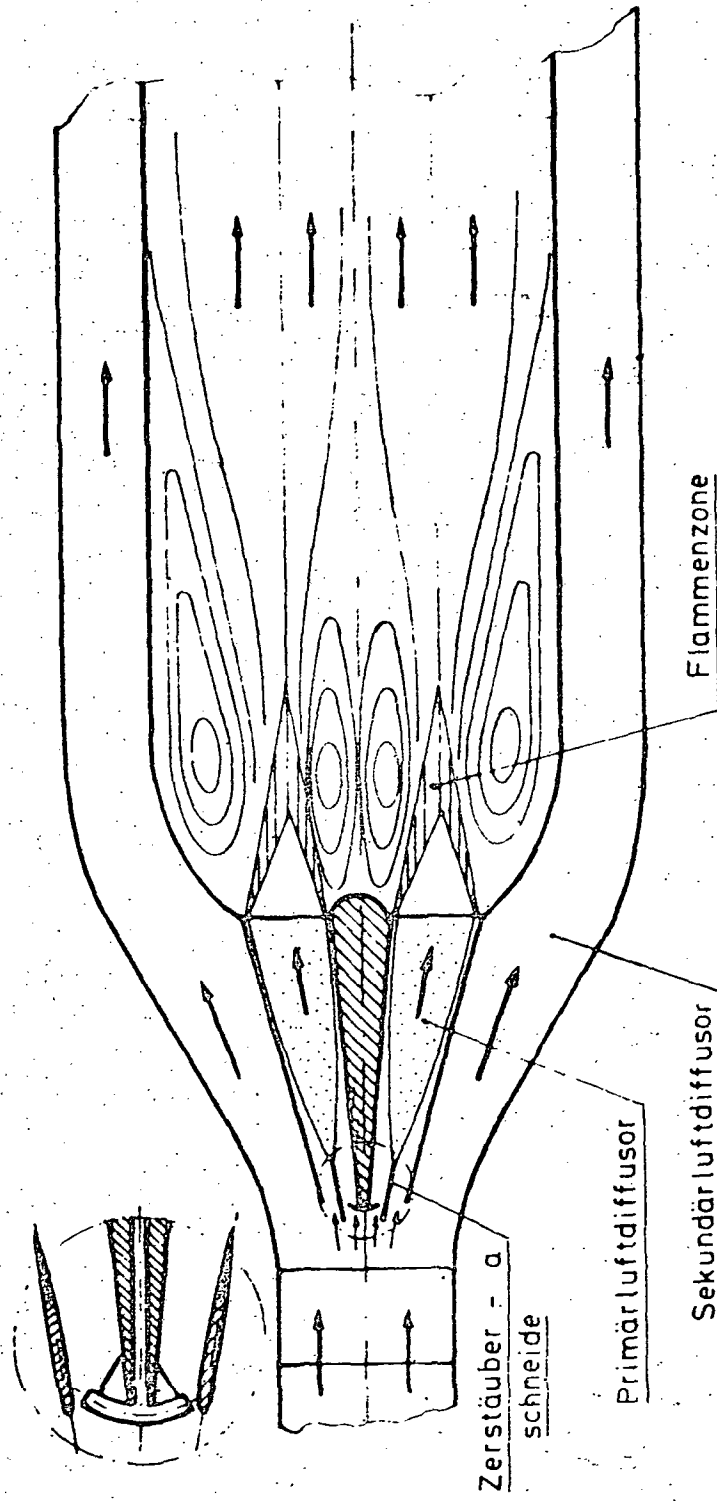


Bild 15 Prinzipskizze einer Ringbrennkammer - Primärzone mit
ebenen Luftstromzerstäubern in den Primärluft - Diffusoren



END

DATE

FILMED

FEB 16

1978